

유도전동기의 직접토크제어 시스템에서 출력전압벡터선정을 위한 시간지연의 보상

Time Delay Compensation for Output Voltage Vector Selection in Direct Torque Control of Induction Machine

최병태, 박철우, 권우현

(Byeong-Tae Choi, Chul-Woo Park, and Woo-Hyen Kwon)

Abstract : This paper proposes a simple compensation scheme for the time delay caused by measurement, calculation and selection of voltage vector in Direct Torque Control (DTC) of an induction motor. In general scheme, it is difficult to know the exact delay time, furthermore the delay time can be varied by program routines for calculation and processing of measured data. In this proposed scheme, by applying voltage vector at the beginning of next sampling period, a fixed delay time is achieved and its compensation becomes much simpler. Furthermore, with the simple compensation algorithm, an improved performance can be achieved by shortening sampling period. Experimental results prove the feasibility of the proposed scheme in induction motor control.

Keywords : direct torque control, time delay compensation, induction motor

I. 서론

1980년대 중반 Takahashi[1], Depenbrock[2] 등에 의해 제안된 직접토크제어(DTC, Direct Torque Control) 기법은 빠른 응답특성과 단순한 구조 그리고 전동기 변수의 변화에 강인함 등의 장점으로 인하여 점차 관심이 높아지고 있으며, 따라서 관련된 논문들도 많이 발표되고 있다.

유도전동기의 직접토크제어 기법은 먼저 전압 및 전류를 측정하여 고정자 자속과 토크를 계산하고, 계산된 자속과 토크가 주어진 히스테리시스 밴드 내에서 명령치를 추종하도록 하는 최적의 전압벡터를 선택하여 전동기에 인가하는 것으로 이루어진다. 그러므로 전압 및 전류의 측정에서부터 전압벡터의 인가까지가 한 사이클을 이루며, 매 사이클마다 최적의 전압벡터가 전동기에 인가된다. 사이클의 발생 간격 즉 샘플링 주기가 짧을수록 자속 및 토크가 히스테리시스 밴드를 벗어나지 않도록 제어가능하며 만약 샘플링 주기가 길다면 자속 및 토크가 히스테리시스 밴드를 벗어나서 큰 리플을 가지게 되어 전동기의 동작성능이 저하된다. 충분히 짧은 샘플링 주기를 가진 직접토크제어 시스템의 경우 히스테리시스 밴드의 크기를 줄임으로써 자속과 토크의 리플을 줄이고 결과적으로 고정자 전류의 파형을 개선시키고 전동기의 소음을 줄일 수 있다. 하지만, 너무 작은 크기의 히스테리시스 밴드는 스위칭 주파수를 크게 하여 스위칭 손실을 증가시키므로 적절하게 히스테리시스 밴드의 크기를 설정하여야 한다. 히스테리시스 밴드의 크기가 적절히 설정되었다고 하더라도 전동기 속도나 자속의 크기, 출력

토크의 크기에 따라서 스위칭 주파수가 변하므로 이에 대한 분석이나 개선을 위한 연구가 계속되고 있다[3]. 짧은 샘플링 주기를 갖도록 직접토크제어 시스템을 구성하려면 아날로그 시스템을 사용하거나 고성능의 ADC와 프로세서로 구성된 디지털 시스템을 사용하여야 한다. 아날로그 시스템의 경우 전체 회로가 복잡하고 시스템의 신뢰도가 떨어지며 새로운 알고리즘의 적용이 어렵게 된다. 디지털 시스템으로 고성능의 직접토크제어 시스템을 구성하려면 25 μ sec 이하의 짧은 샘플링 주기를 가져야 하는데[4], 이를 구현하려면 1MSPS(Mega Sampling Per Second)이상의 고성능 ADC와 고가의 DSP 소자를 사용하여야 하므로 결국 시스템의 가격이 상승하게 된다. 직접토크제어 시스템을 일반적인 ADC와 저가의 DSP 소자로 구성할 경우 샘플링 주기가 길어지고 따라서 자속 및 토크의 리플이 커지게 되어 시스템의 성능이 떨어진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 직접토크제어의 기본 개념에 공간벡터변조(SVM, Space Vector Modulation)기법을 사용하거나[5], 보조 제어기를 사용하여 주 제어기에서 발생된 출력전압벡터의 인가시간을 줄이는 등의 기법[6][7]이 제시되었다.

한편, 디지털로 구현된 직접토크제어 시스템의 경우 전압 및 전류의 측정시점과 전압벡터 인가시점 간에 시간차가 존재하며 그 시간차 동안에 자속 및 토크의 변화가 생기므로 측정시점을 기준으로 선택된 전압벡터는 인가시점에서 부적절할 수 있다. 특히 고성능이 아닌 일반성능의 ADC와 프로세서로 구성된 시스템의 경우 긴 샘플링주기로 인한 자속 및 토크의 큰 리플에 추가하여 측정시점과 인가시점의 시간차에 따른 부적절한 전압벡터의 출력으로 인하여 더욱 리플이 커지게 된다. 이러한 경우 그 시간차에 해당하는 지연시간을 고려하여 측정시점의 자속과 토크로부터 다시 인가시점의 자속과 토크를 추정하고 이를 이용하여 전압벡터를 선정하여 출력하여야 한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 3. 7., 채택확정 : 2003. 5. 27.

최병태, 박철우, 권우현 : 경북대학교 전자공학과

(btchoi@palgong.knu.ac.kr/true@palgong.knu.ac.kr/whkwon@ee.knu.ac.kr)

※ 본 논문은 2002년도 경북대학교 특성화사업팀(KNURT) 연구비에 의하여 연구되었음.

본 논문에서는 디지털로 구현된 직접토크제어 시스템에서 전압벡터 인가에 따른 시간지연의 보상을 간단히 구현할 수 있는 기법을 제시한다. 일반적인 구현기법에서는 출력전압의 인가시점을 정확히 알기가 어렵고 또한 측정값의 계산 및 처리과정에서 그 시점이 샘플링주기마다 변할 수 있는데 비해 본 논문에서 제시하는 기법에서는 제어주기의 시작부분에 전압벡터를 인가함으로써 정확하고 고정된 인가시점을 얻을 수 있다. 따라서 출력전압 인가에 따른 시간지연의 보상이 간단히 구현되며 이로인해 전체 제어주기를 줄여 시스템의 성능을 향상시킬 수도 있다. 본 논문에서 제시하는 방안이 타당함을 검증하기 위하여 여러 종류의 직접토크제어 기법 중 가장 기본적인 구조를 가지는 기법(Conventional-DTC)과 토크리플을 최소화 시키도록 제안된 기법[6](Torque Ripple Minimization Strategy, 이하 TRM-DTC라 칭함)의 두 가지 경우에 대해 모의실험과 실험을 수행한다.

II. Conventional-DTC 및 TRM-DTC의 기본개념

1. Conventional-DTC의 기본개념

2상 d-q정지좌표계로 표현되는 3상 유도전동기에서 고정자저항에 의한 전압강하를 무시한다면 전압방정식은

$$\Delta \lambda_s \approx v_s dT \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 v_s , λ_s 는 각각 $v_s = [v_{sd} \ v_{sq}]^T$, $\lambda_s = [\lambda_{sd} \ \lambda_{sq}]^T$ 로 정의되는 고정자 전압과 자속을 나타내는 공간벡터이고, dT 는 짧은 샘플링 시간 그리고 Δ 는 변화분을 나타낸다. (1)은 고정자 전압벡터를 인가하면 인가된 전압벡터의 방향으로 고정자 자속벡터의 변화가 생기며, 변화분의 크기는 인가된 전압벡터와 인가시간의 곱과 같은 것을 의미한다.

유도전동기의 토크방정식은

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} \operatorname{Im}[\lambda_s \cdot \lambda_r^*] \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} |\lambda_s| |\lambda_r| \sin \delta \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 표현된다. (2)에서 T_e 는 토크, λ_r 는 $\lambda_r = [\lambda_{rd} \ \lambda_{rq}]^T$ 로 정의되는 회전자 자속벡터이고, P 는 전동기 극수, M 은 상호인덕턴스, L_s , L_r 은 고정자 및 회전자 인덕턴스를 나타내며, δ 는 고정자와 회전자 사이의 자속각을 나타낸다. σ 는 $\sigma = 1 - M^2 / L_s L_r$ 로 정의되고, “*”는 콜레 복소수를 나타낸다. (2)에서 고정자 자속 및 회전자 자속의 크기가 일정하다면 그 사이의 자속각으로 토크를 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 회전자보다 고정자 측의 시정수가 충분히 작으므로 순간적인 고정자 자속벡터의 변화는 고정자 및 회전자 자속 사이의 자속각을 변화시키고 이는 토크의 변화를 발생시킨다. 즉, (1)과 (2)에서 보듯이, 인버터를 통한 전압벡터의 인가는 전압벡터의 방향으

로 고정자 자속의 변화분을 발생시키고, 고정자 자속의 변화는 회전자 자속과의 자속각을 변화시켜 토크를 발생시킬 수 있다.

3상 전압원 인버터에서 가능한 출력은 2개의 영전압벡터와 6개의 유효전압벡터가 있으며 공간좌표상에서 구분된 6개의 섹터에 따라 전압벡터가 자속에 미치는 영향은 다르다. 그러므로 DTC시스템의 기본 동작은 먼저 전동기의 전압 및 전류로부터 고정자 자속과 자속이 속해있는 섹터 그리고 토크를 계산하고, 자속 및 토크가 주어진 명령치를 따라가도록 증가 또는 감소시키는 적절한 전압벡터를 선택하여 인가하는 것으로 이루어진다. 영전압벡터의 인가는 고정자 저항과 전류에 의한 전압 강하분 만큼 자속 및 토크를 감소시킨다.

2. TRM-DTC의 기본개념

TRM-DTC[6]는 Conventional-DTC의 기본개념에 토크리플을 최소화하도록 제안된 알고리즘을 적용한 것으로서, 매 제어주기마다 출력되는 유효전압벡터를 제어주기의 일부분에서만 인가하고 나머지에서는 영전압벡터를 인가하여 토크리플을 줄인다. TRM-DTC에서는 히스테리시스 벤드의 크기를 영으로 두며, 이에 따른 토크의 정상상태 리플패턴은 그림 1과 같다.

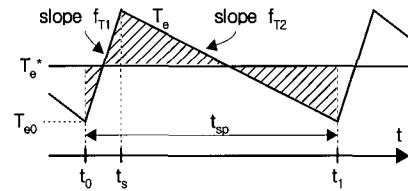


그림 1. TRM-DTC의 토크리플 패턴.

Fig. 1. Torque ripple pattern of TRM-DTC.

그림 1의 t_0 시점에서 토크값 T_{e0} 가 토크 명령치 T_e^* 보다 작으므로 유효전압벡터를 인가하여 토크를 상승시킨다. Conventional-DTC에서는 다음 제어주기의 전압벡터 인가시점인 t_1 에서 적절한 전압벡터를 다시 인가하지만, TRM-DTC에서는 그림 1의 토크리플 패턴이 반복되도록 타이머 인터럽터 등의 보조제어기를 사용하여 적절한 시점 t_s 에서 영전압벡터를 인가하여 토크를 하강시킨다. 영전압벡터의 인가시점인 t_s 는 명령치에 대한 토크리플의 실효치가 최소화 되도록 결정하거나[6] 토크리플의 면적이 최소화 되도록 결정하는[7] 등의 방법이 있다. 본 논문에서는 토크리플의 실효치가 최소화 되도록 t_s 를 결정하는 방법을 이용하여 이 경우 자속 및 토크의 이산방정식에서 유효전압벡터가 인가 될 경우의 토크 상승기울기 f_{T1} 과 영전압벡터가 인가될 경우의 토크 하강기울기 f_{T2} 그리고 샘플링 간격 t_{sp} 로 계산된 t_s 는 (3)과 같이 표현된다.

$$t_s = \frac{2(T_e^* - T_{e0}) - f_{T2}t_{sp}}{2f_{T1} - f_{T2}} \quad (3)$$

III. 전압벡터인가에 따른 시간지연 보상

1. Conventional-DTC에서 시간지연 보상

Conventional-DTC에서는 전압 및 전류의 측정으로부터 전압벡터의 인가까지가 한 사이클을 이루며, 매 사이클마다 최적의 전압벡터가 전동기에 인가된다. 사이클의 시작시점 즉 인터럽터 시작시점에서 측정된 전압 및 전류로부터 자속과 토크를 계산하고 이를 바탕으로 전압벡터를 선정하여 인가한다. 즉 측정시점의 데이터를 기준으로 선택된 전압벡터는 측정시점에서 인가되어야 할 최적의 전압벡터이다. 만약 전압 및 전류의 측정으로부터 전압벡터의 출력까지 걸리는 시간지연이 커진다면, 자속 및 토크의 변화로 인해 인가시점에서는 적절하지 않은 전압벡터가 출력될 수 있다. 그러므로, 이러한 경우 시간지연에 따른 자속과 토크의 변화를 고려하여 출력전압벡터를 선정하여야 한다.

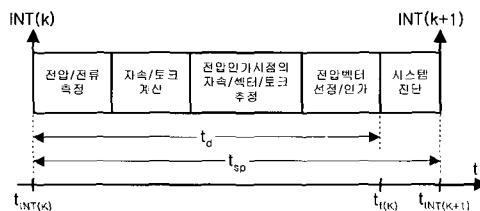


그림 2. 시간지연이 보상된 Conventional-DTC의 기본사이클.

Fig. 2. Basic cycle of time delay compensated Conventional-DTC.

그림 2는 시간지연이 보상된 경우 Conventional-DTC 시스템의 기본사이클을 나타낸다. 여기서는 전압 및 전류의 측정시점 $t_{INT(k)}$ 에서의 자속과 토크의 기울기를 구하고 여기에 인가지연시간인 t_d 를 곱하여 전압벡터 인가시점인 $t_{f(k)}$ 에서의 자속과 토크를 추정한다. 그리고 추정된 자속과 토크를 바탕으로 전압벡터를 선정하고 인가한다. 고정자자속의 $t_{INT(k)}$ 시점에서의 기울기 f_F 는 전동기의 전압방정식으로부터 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$f_F = v_s - R_s i_s \quad (4)$$

여기서, $f_F = [f_{Fd} \ f_{Fq}]^T$ 이다. 그리고 토크의 $t_{INT(k)}$ 시점에서의 기울기 f_T 는 아래와 같이 쓸 수 있다[6].

$$f_T = -\frac{T_e}{\sigma \tau_{sr}} + \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} - \cdot [-V_{sd} \lambda_{rq} + V_{sq} \lambda_{rd} - \omega_r (\lambda_{sd} \lambda_{rd} + \lambda_{sq} \lambda_{rq})] \quad (5)$$

여기서, V_{sd} 와 V_{sq} 는 측정시점에서 인가되고 있는 전압벡터이다. (4)와 (5)로부터 전압벡터 인가시점에서의 자속 및 토크를 아래와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_s(t_{f(k)}) = \lambda_s(t_{INT(k)}) + f_F \cdot t_d \quad (6)$$

$$\hat{T}_e(t_{f(k)}) = T_e(t_{INT(k)}) + f_T \cdot t_d \quad (7)$$

2. TRM-DTC에서 시간지연 보상

TRM-DTC 역시 전압과 전류의 측정시점에서부터 전압벡터의 출력까지 시간지연이 발생하며 이로 인해 출력시점에서 잘못된 전압벡터가 선택되고 인가될 수 있다. 그러므로 전압벡터 인가시점에서의 자속 및 토크를 추정하고 이를 바탕으로 전압벡터를 선택하여야 한다.

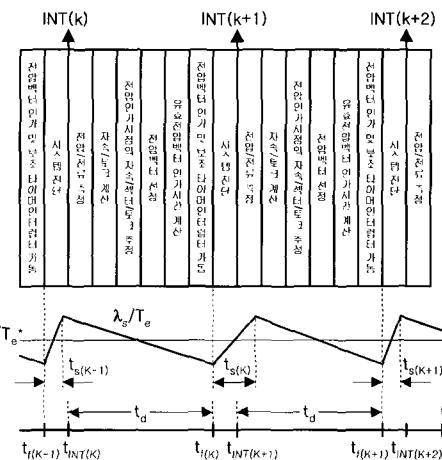


그림 3. 시간지연이 보상된 TRM-DTC의 기본 사이클.

Fig. 3. Basic cycle of time delay compensated TRM-DTC.

그림 3은 시간지연이 보상된 TRM-DTC 시스템의 기본사이클을 나타낸다. k번째 인터럽터 시작시점 $t_{INT(k)}$ 에서 측정된 전압 및 전류로부터 자속과 토크를 계산하고 다시 출력전압벡터의 인가시점인 $t_{f(k)}$ 에서의 자속 및 토크값을 추정하여 이로부터 전압벡터를 선정한다. 자속 및 토크의 추정값과 선정된 전압벡터를 이용하여 토크의 상승기울기 및 하강기울기를 계산하고 (3)을 이용하여 유효전압벡터의 인가시간인 $t_{s(k)}$ 를 구한다. 그리고 $t_{f(k)}$ 시점에서 유효전압벡터를 인가함과 동시에 보조 타이머를 기동시키 $t_{s(k)}$ 시간 이후에 영전압벡터를 출력하도록 한다. 출력전압 인가시점의 자속 및 토크는 측정시점의 기울기로부터 추정할 수 있다.

그림 4의 (a)는 유효전압이 인가되고 있을 때 ADC를 수행한 경우를 나타낸 것이다. 측정한 전압 및 전류로부터 측정시점 $t_{INT(k)}$ 에서의 자속과 토크의 기울기를 구하고 유효전압 인가를 위해 남은시간 t_A 와 영전압 인가를 위해 남은시간 t_B 를 이용해 전압벡터 인가시점 $t_{f(k)}$ 에서의 자속과 토크값을 추정할 수 있다. 측정시점에서 자속의 기울기는 (4), 토크의 기울기는 (5)를 이용하여 구할 수 있다. $t_{f(k-1)}$ 시점에서 유효전압을 인가하고 영전압 인가를 위해 보조타이머를 기동시키므로 ADC시점에서 보조타이머 카운터를 읽어서 t_a 를 알 수 있으며 (8)로부터 t_A 와 t_B 를 계산할 수 있다.

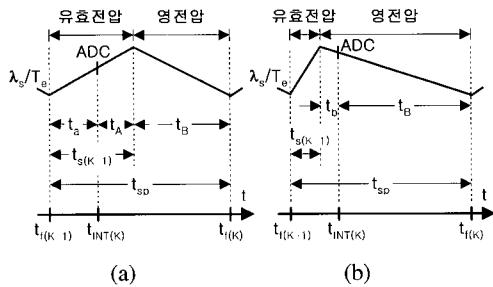


그림 4. TRM-DTC에서 유효전압 인가시간에 따른 측정 시점의 구분. (a) 유효전압 인가구간에서 ADC를 수행 할 경우. (b) 영전압 인가구간에서 ADC를 수행할 경우.

Fig. 4. Classification by measuring instant in TRM-DTC. (a) ADC when active voltage applied. (b) ADC when zero voltage applied.

$$\begin{aligned} t_A &= t_{s(k-1)} - t_a \\ t_B &= t_{sp} - t_{s(k-1)} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 $t_{f(k)}$ 시점의 자속과 토크는 아래와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_s(t_{f(k)}) = \lambda_s(t_{INT(k)}) + f_{F1} \cdot t_A + f_{F2} \cdot t_B \quad (9)$$

$$\hat{T}_e(t_{f(k)}) = T_e(t_{INT(k)}) + f_{T1} \cdot t_A + f_{T2} \cdot t_B \quad (10)$$

(9)에서 f_{F1} 은 (4)에 유효전압벡터를, f_{F2} 는 (4)에 영전압 벡터를 대입한 값이며, (10)에서 f_{T1} 은 (5)에 유효전압벡터를, f_{T2} 는 (5)에 영전압벡터를 대입한 값이다.

그림 4의 (b)는 영전압이 인가되고 있을 때 ADC를 수행 한 경우를 나타낸 것이다. 위와 마찬가지로 측정한 전압 및 전류로부터 측정시점 $t_{INT(k)}$ 에서의 자속과 토크의 기울기를 구하고 영전압 인가를 위해 남은시간 t_B 를 이용해 전 압벡터 인가시점 $t_{f(k)}$ 에서의 자속과 토크값을 추정할 수 있다. 보조 타이머 인터럽터가 발생하여 영전압벡터를 인가 할 때 보조타이머의 카운터를 리셋 후 새로 기동시키고 ADC 시점에서 보조타이머 카운터를 읽어서 t_b 를 알 수 있으며 (11)로부터 남은시간 t_B 를 알 수 있다.

$$t_B = t_{sp} - t_{s(k-1)} - t_b \quad (11)$$

따라서 $t_{f(k)}$ 시점의 자속과 토크는 아래와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_s(t_{f(k)}) = \lambda_s(t_{INT(k)}) + f_{F2} \cdot t_B \quad (12)$$

$$\hat{T}_e(t_{f(k)}) = T_e(t_{INT(k)}) + f_{T2} \cdot t_B \quad (13)$$

IV. 새로운 구현기법에 의한 전압벡터인가 시간지연보상

일반적으로 디지털로 구현된 DTC 시스템의 기본 사이클은 그림 5에서 보는 바와 같이 측정된 전압, 전류로부터 자속과 토크를 구하고 이를 바탕으로 적절한 알고리즘을 통해 전압벡터를 선정하고 인가하는 방식으로 구성된다.

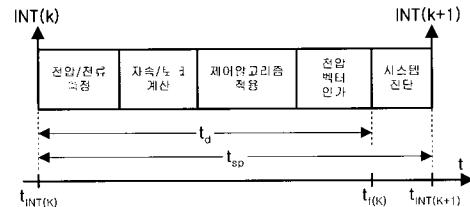


그림 5. 일반적인 DTC 알고리즘.

Fig. 5. General DTC algorithm.

최적의 전압벡터를 선정하기 위해서는 측정에서부터 전 압인가까지의 시간지연이 고려되어야하고 특히 긴 커버전 시간을 가지는 ADC, 계산시간이 오래 걸리는 프로세서나 알고리즘을 사용할 경우 시간지연보상이 필수적이다. Conventional-DTC에서 시간지연을 보상할 경우 지연시간인 t_d 를 안다는 가정하에서 시간지연을 보상하였지만 실제로는 오실로스코프를 사용하여 t_d 를 측정하는 등의 복잡한 확인을 필요로 하며 측정된 t_d 라 하더라도 프로그램 상의 조건문 등에 의해 매 샘플링주기마다 조금씩 달라질 수 있다. TRM-DTC에서 시간지연을 보상할 경우 지연시간인 t_d 를 이용하지는 않았지만 측정시점에서의 인가전압 판단과 이에 따른 보조타이머 구동 그리고 인가시점까지의 남은 시간 계산등을 수행하는데 시간이 많이 걸리며 구현이 복잡하였다.

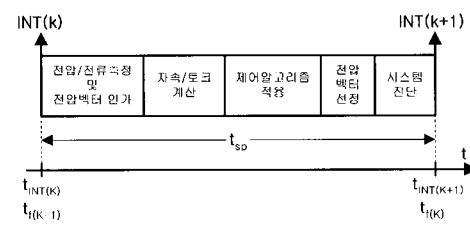


그림 6. 본 논문에서 제안하는 기법에 의한 DTC 알고리즘.

그림 6은 본 논문에서 제안하는 DTC 구현 기법이며 매 제어주기의 시작부분에서 전압, 전류의 측정과 전압벡터의 인가를 동시에 하도록 구성되어있다. 이때 전압벡터 인가에 따른 지연시간 t_d 는 이미 알고있는 제어주기 t_{sp} 와 같아지므로 정확하고 항상 동일한 시간을 유지하며 또한 전압 벡터 인가시점과 측정시점이 동일하므로 추정된 자속, 토크 값과 실제 자속, 토크값을 비교하여 추정 오차를 검출할 수 있다. 제안된 기법을 사용할 경우, (6)과 (7)로 표현된 Conventional-DTC 시스템의 자속 및 토크의 추정은 (14-15)와 같이 표현 된다. (14-15)의 경우, (6-7)과 비교하여 자속

과 토크를 추정하는 연산시간은 동일하지만 지연시간 t_d 를 번거롭게 측정할 필요가 없으며, 또한 항상 고정되고 정확한 지연시간을 보장받게 된다.

$$\hat{\lambda}_s(t_{f(k)}) = \lambda_s(t_{INT(k)}) + f_F \cdot t_{sp} \quad (14)$$

$$\hat{T}_e(t_{f(k)}) = T_e(t_{INT(k)}) + f_T \cdot t_{sp} \quad (15)$$

(9-10)과 (12-13)으로 표현된 TRM-DTC 시스템의 자속 및 토크의 추정은 제안된 기법을 사용할 경우 ADC시점의 구분없이 아래와 같이 간단히 표현된다.

$$\hat{\lambda}_s(t_{f(k)}) = \lambda_s(t_{INT(k)}) + f_{F1} \cdot t_{s(k-1)} + f_{F2} \cdot (t_{sp} - t_{s(k-1)}) \quad (16)$$

$$\hat{T}_e(t_{f(k)}) = T_e(t_{INT(k)}) + f_{T1} \cdot t_{s(k-1)} + f_{T2} \cdot (t_{sp} - t_{s(k-1)}) \quad (17)$$

(16-17)의 경우, (9-10) 및 (12-13)의 경우와 비교하여 ADC 시점에서 인가전압의 판단과 보조타이머의 추가적인 구동이 필요없고 또한 자속과 토크를 추정하는 연산식이 간단해지므로 제어주기 내에서 전체적인 동작시간이 줄어들게 된다. 따라서 줄어든 동작시간에 해당하는 만큼 샘플링주기를 줄일 수 있으며 이에 따라 시스템의 성능이 향상될 수 있다.

V. 모의실험 및 실험

모의실험 및 실험에 사용된 DTC 시스템은 그림 7과 같이 구성되었고, 모터사양은 표 1에 나타나있다.

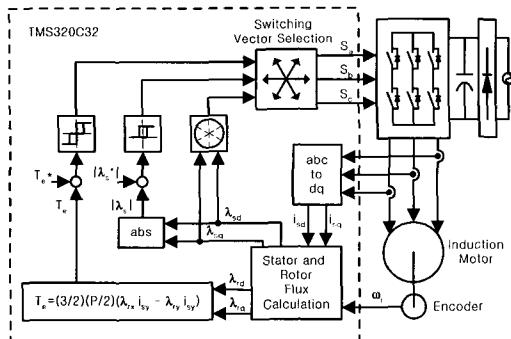


그림 7. 모의실험 및 실험에 사용된 DTC 시스템의 블록도.
Fig. 7. Block diagram of DTC system.

실험에는 25MIPS(Million Instructions Per Second), 50MFLOPS(Million Floating Point Operations Per Second)의 성능을 가진 Texas Instruments사의 저가 DSP 프로세서인 TMS320C32를 사용하였으며 그림 7의 점선 블록부분을 수행한다. Analog-to-Digital 컨버터로는 Analog Devices사의 motion-coprocessor인 ADMC201을 사용하였는데 11-bit resolution으로 4채널을 동시에 측정할 수 있는 ADC가 내부에 있으며, 1.6 μ sec의 sample and hold acquisition 시간을

포함하여 4채널을 동시에 측정할 때 15 μ sec의 컨버전시간을 필요로 한다. 실험에서 데이터의 획득은 매 샘플링마다 데이터를 메모리(RAM)에 저장하고, 실험이 끝난 후 저장된 데이터를 RS-232 통신으로 외부 컴퓨터로 받아서 MATLAB으로 디스플레이하였다.

표 1. 모터사양

Table 1. Motor specification.

정격출력	1.5 [kW]	고정자저항(R_s)	0.86 [Ω]
정격전압	180 [V]	회전자저항(R_r)	0.84 [Ω]
정격전류	6.6 [A]	고정자누설 인덕턴스 (L_{ls})	2.7 [mH]
정격주파수	60.3 [Hz]	회전자누설 인덕턴스 (L_b)	2.7 [mH]
정격회전수	1750 [rpm]	상호인덕턴스 (M)	98.5 [mH]
극수	4	점성마찰계수 (B)	0.45 [$N \cdot m$ $\cdot s/rad$]
관성계수(J)	0.025 [kg · m ²]		

모의실험에는 MATLAB/SIMULINK의 Power System Block Set(이하 PSBS라 칭함)을 사용하여 구성하였다. 모의실험을 실제 실험과 동일한 조건으로 만들기 위하여 PSBS에서 제공하는 IGBT block을 이용하여 3상 인버터를 구현한 후 전동기를 구동하였으며 실제 실험에서 사용되는, C언어로 작성된 프로그램을 MATLAB에서 사용되는 언어인 M-FILE로 변환한 후 S-FUNCTION 블록에 삽입하여 그림 7의 TMS320C32 블록을 대체하여 사용함으로써 모의실험과 실제 실험이 사실상 동일한 프로그램으로 동작하도록 구성하였다.

Conventional-DTC의 모의실험 및 실험파형이 그림 8과 그림 9에 각각 나타나있다. (a)는 출력전압 인가에 따른 시간지연보상을 하지 않은 경우, (b)는 일반적인 방법으로 시간지연보상을 하였을 경우, (c)는 본 논문에서 제안한 기법을 이용하여 시간지연보상을 하였을 경우의 결과이다. 모의실험과 실험에서 사용된 제어주기는 90 μ sec이며 고정자 자속과 토크의 명령치는 정격값인 0.35[Wb]과 8[Nm]로 주었고 히스테리시스 밴드의 크기는 영으로 설정하였다. 초기 고정자 자속의 확립을 위해 자속의 증가는 v_1 벡터, 감소는 v_0 벡터를 인가해 주는데 이때 고정자 전류의 최대치를 15A로 제한하였으며 이로인해 자속확립에 약 0.025초가 소요된다. 토크 명령은 0.03초에 인가하였다. 히스테리시스 밴드가 영임에도 불구하고 90 μ sec의 긴 제어주기와 시간지연에 따른 잘못된 전압벡터의 출력으로 인해 자속과 토크에 큰 리플이 발생함을 (a)에서 볼 수 있으며, 출력전압 인가에 걸리는 시간지연보상을 통하여 자속 및 토크의 리플이 줄어듦을 (b) 및 (c)에서 확인할 수 있다. (b)는 오실로스코프로 80ms μ sec의 전압벡터 인가시간지연이 생김을

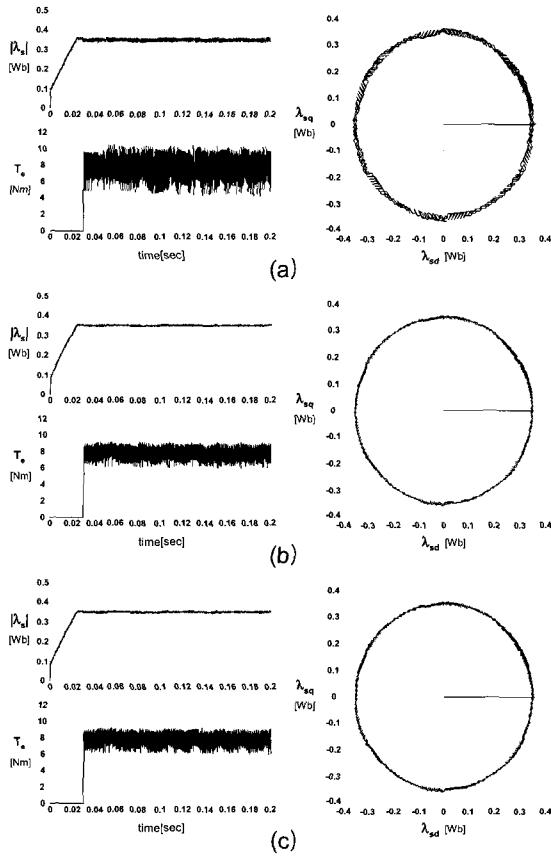


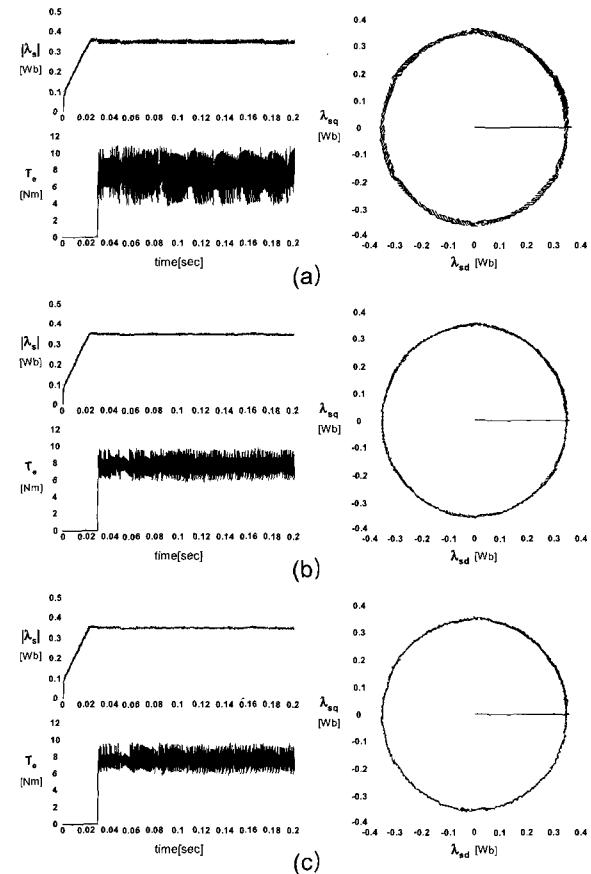
그림 8. 고정자 자속 및 토크의 모의실험파형

($t_{sp} = 90\mu s$). (a) Conventional-DTC. (b) 시간지연이 보상된 Conventional-DTC (c) 제안된 기법으로 구성된 Conventional-DTC.

Fig. 8. Simulation results of stator flux and torque.
($t_{sp} = 90\mu s$). (a) Conventional-DTC. (b) time delay compensated Conventional-DTC. (c) proposed Conventional-DTC.

확인한 이후 평균값인 $80\mu s$ 로 시간지연보상에 적용한 경우이며, (c)는 번거로운 확인작업 없이 제어주기인 $90\mu s$ 를 바로 시간지연보상에 적용한 경우이다. 따라서 자속 및 토크 파형의 결과는 유사하지만, 제안된 기법을 적용할 경우 DTC 시스템은 고정된 전압인가 지연시간을 가지며 이로인해 시간지연보상이 간단해짐을 확인할 수 있다.

TRM-DTC의 모의실험 및 실험파형은 그림 10과 그림 11에 각각 나타나있다. (a)는 본 논문의 III.2절에 기술된 방식으로 시간지연을 보상한 경우이며, (b)는 본 논문에서 제안하는 IV장에 기술된 방식으로 시간지연을 보상한 경우의 파형이다. (a)와 (b) 모두 고정자 자속 파형에서 자속저하 현상을 볼 수 있는데, 이는 한 섹터 내에서 동일한 전압벡터라도 그 위치에 따라 고정자 자속의 증가 또는 감소에 미치는 영향이 다르기 때문이며 가변스위칭섹터기법[8] 등을 통하여 보완할 수 있다. (a)에서는 추정된 인가시점의 토크가 명령치보다 작을 때 유효전압벡터를 인가하고 t_s 시

그림 9. 고정자 자속 및 토크의 실험파형($t_{sp} = 90\mu s$)

(a) Conventional-DTC. (b) 시간지연이 보상된 Conventional-DTC (c) 제안된 기법으로 구성된 Conventional-DTC.

Fig. 9. Experimental results of stator flux and torque.
($t_{sp} = 90\mu s$). (a) Conventional-DTC. (b) time delay compensated Conventional-DTC. (c) proposed Conventional-DTC.

간 이후에 영전압벡터를 인가하여 그림 1의 토크리플패턴이 반복되도록 한다. 추정된 토크가 명령치보다 크면 유효전압벡터를 인가하지 않고 제어주기 t_{sp} 동안 영전압벡터를 인가하는데 실험에서는 추정토크의 오차범위를 명령토크 $8[Nm]$ 의 2%로 설정하였으며 이에 따라 추정토크가 $8.16[Nm]$ 보다 크면 영벡터를 제어주기 t_{sp} 동안 인가한다. 영전압벡터 인가시 토크 상승기울기와 하강기울기는 동일한 값이되며 이러한 지점이 발생됨을 그림 11의 (a)에서 볼 수 있다.

(b)의 경우 측정된 토크가 명령치보다 작게 나타나는데 이는 그림 1의 TRM-DTC의 토크리플 패턴에서 볼 수 있듯이 제시된 기법의 경우 측정시점과 유효전압벡터 인가시점이 동일하기 때문이다. 기존의 TRM-DTC의 경우 측정시점에서 인가되고 있는 전압벡터가 유효전압벡터인지 또는 영전압벡터인지를 판단하고 이에 따라 (9-10)과 (12-13)중 해당하는 식을 적용하여 자속 및 토크를 측정하고 또한 보조

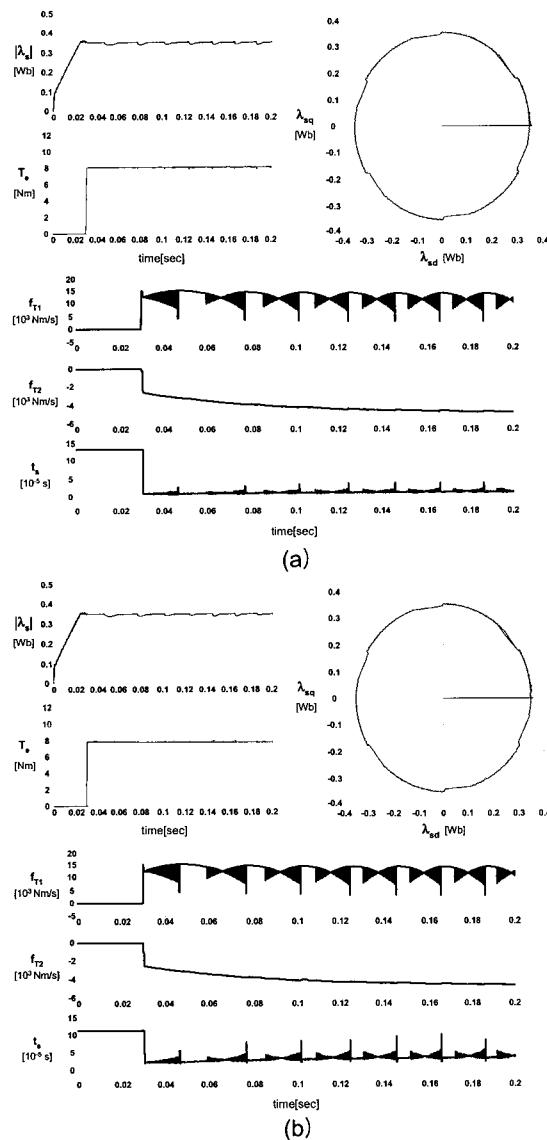


그림 10. (a) TRM-DTC의 모의실험파형($t_{sp} = 130 \mu s$).
 (b) 제안된 기법으로 구성한 TRM-DTC의 모의
 실험파형($t_{sp} = 110 \mu s$).

Fig. 10. (a) Simulation results of TRM-DTC($t_{sp} = 130 \mu s$).
 (b) Simulation results of proposed TRM-DTC
 ($t_{sp} = 110 \mu s$).

타이머에서 영전압을 인가한 이후에 다시 타이머를 리셋하고 재구동시키는 등의 작업으로 인해 제어주기가 $130 \mu s$ 로 설정된 반면, 본 논문에서 제시된 기법으로 구현한 TRM-DTC에서는 이러한 복잡한 과정이 없어지므로 한 사이클 내에서 동작시간이 기존의 TRM-DTC에 비해 약 $20 \mu s$ 줄어들어 제어주기를 $110 \mu s$ 로 설정할 수 있었다.

모의실험 및 실험 결과로부터 본 논문에서 제안한 기법으로 DTC 시스템을 구현할 경우 전압 및 전류의 측정시점으로부터 출력전압 인가까지 걸리는 시간지연이 고정되고 이에 따라 시간지연의 보상이 간단해지며, 결과적으로 제어주기를 단축시킬 수도 있음을 확인하였다.

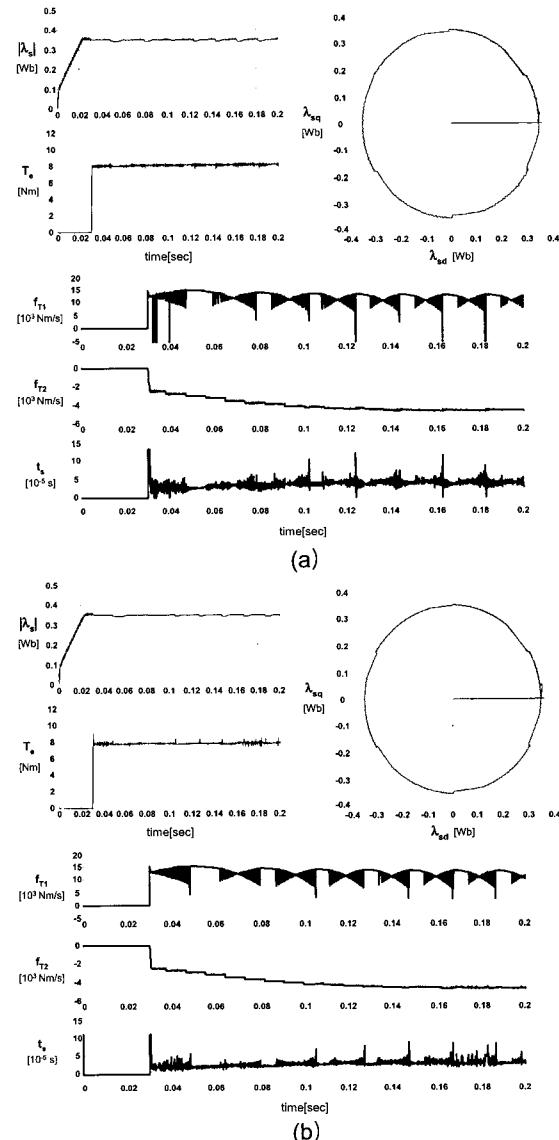


그림 11. (a) TRM-DTC의 실험파형($t_{sp} = 130 \mu s$). (b) 제안
 된 기법으로 구성한 TRM-DTC의 실험 파형
 ($t_{sp} = 110 \mu s$).

Fig. 11. (a) Experimental results of TRM-DTC($t_{sp} = 130 \mu s$).
 (b) Experimental results of proposed TRM-DTC
 ($t_{sp} = 110 \mu s$).

VI. 결론

본 논문에서는 디지털로 구현된 DTC시스템에서 전압 및 전류의 측정시점으로부터 출력전압벡터를 인가 할 때까지 걸리는 시간지연의 보상을 간단히 구현하는 기법을 제시하였다. 일반적인 DTC 구현기법에서는 출력전압의 인가시점을 정확히 알기가 어렵고 또한 측정값의 계산 및 처리 과정에서 그 시점이 변할 수 있는데 비해 본 논문에서 제시된 기법에서는 출력전압의 인가시점을 제어주기로 고정시킴으로써 출력전압인가에 따른 시간지연의 보상이 간단히 구현되어 이로인해 제어주기를 줄일 수 있음을 모의실험과 실험을 통해 확인하였다.

참고문헌

- [1] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor", *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. IA-22, no. 5, pp. 820-827, 1986.
- [2] M. Depenbrock, "Direct self-control(DSC) of inverter-fed induction machine", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 420-429, 1988.
- [3] J. K. Kang and S. K. Sul, "Analysis and prediction of inverter switching frequency in direct torque control of induction machine based on hysteresis bands and machine parameters", *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 48, no. 3, pp. 545-553, 2001.
- [4] P. Tiitinen, "The next motor control method, DTC direct torque control", *Int'l Conf. on Power Electronics, drives & energy system for Industrial growth, India*, pp. 37-43, 1996.
- [5] Y. S. Lai and J. H. Chen, "A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 16, no. 3, 2001.
- [6] J. K. Kang and S. K. Sul, "Torque ripple minimization strategy for direct torque control of induction motor", *Conference Record of IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting*, pp. 438-443, 1998.
- [7] K. K. La, M. H. Shin, D. S. Hyun, "Direct torque control of induction motor with reduction of torque ripple", *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference IECON-2000*, pp. 1087-1092, 2000.
- [8] R. D. F Rossi, B. R. Menezes, S. R. Silva, "Vector control of voltage fed three-phase inverters : variable switching regions", *IEEE PESC Proc.*, Vol. 1, pp. 219-224, 1994.

최병태



1968년 12월 18일생. 1993년 경북대 전자공학과 졸업. 동 대학원 석사(1995), 1998년~현재 동 대학원 박사과정. 1995년~1998년 대우중공업 우주항공연구소 연구원. 관심분야는 마이크로프로세서 응용제어, 전력전자.

박철우



1971년 12월 24일생. 1997년 경북대 전자공학과 졸업. 동 대학원 석사(1999), 1999년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 마이크로프로세서 응용제어, 전력전자.

권우현



1953년 6월 22일생. 1977년 서강대 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 석사(1979), 한국과학기술원 박사(1993). 1979년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수. 관심분야는 컴퓨터응용제어 및 전력전자, 제어계측.